



TITLE:

粘着テープの剥離過程で観られる 時空パターン形成(複雑流体の数理 とその応用)

AUTHOR(S):

山崎, 義弘; 戸田, 昭彦

CITATION:

山崎, 義弘 ...[et al]. 粘着テープの剥離過程で観られる時空パターン形成
(複雑流体の数理とその応用). 数理解析研究所講究録 2006, 1472: 46-55

ISSUE DATE:

2006-02

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/48145>

RIGHT:

粘着テープの剥離過程で観られる時空パターン形成

早稲田大学理工学部 山崎義弘 (Yoshihiro Yamazaki)

広島大学総合科学部 戸田昭彦 (Akihiko Toda)

Faculty of Science and Engineering, Waseda University

Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

1 はじめに

粘着テープが界面剥離する(つまり、基板に貼り付けられた粘着テープが基板と粘着物質の接着界面で剥離する)際に変形した粘着物質によって形成されるパターンに着目した実験および理論的解析の結果を紹介し、パターン形成の物理という観点から剥離挙動を考察する。

2 実験事実のまとめ [1, 2]

剥離における粘着物質の変形と剥離の力学的挙動との関連性についてのこれまでの研究の中で、粘着物質が変形に伴い特徴的な形態を形成することによって、界面剥離時の剥離力と速度との間に出現する非単調性について実験的に調べられてきた [3]。この結果を踏まえて我々は、粘着テープの剥離を一つの力学系として考えたときに、粘着物質の形態形成が系全体の力学的振る舞いにどのような影響を及ぼすかをより詳細に調べた。

2.1 実験の概要

まず、2枚組みになった粘着テープを水平な板の表面に貼り付けた。そして、2枚組のテープのうち、上側のテープの一端とバネ(バネ定数は k)の一端を連結し、バネのもう一方の端を鉛直上方に一定の速度 V で引き上げた(図1参照)。従って、テープはほぼ90度の角度をなして剥離されることになる。我々の実験では、上側のテープのみを下側のテープの背面から剥離している。(つまり、板からの剥離ではない。)また、上側のテープを剥離した際に、下側のテープが板からはがれる事はなく、板に張り付いたままであったことを確認している。我々が用いた粘着テープには、粘着剤として架橋された天然ゴム系物質と、テープのフィルムとしてPETフィルムが使用されていた。粘着テープの幅は25mmであり、PETフィルムの厚さは $25\mu\text{m}$ であった。我々は一定の速度で剥離しているときの剥離力を測定し、粘着物質が変形する様子を光学顕微鏡により観察した。また、粘着テープ上には剥離に伴って変形した粘着物質によるパターンが形成され、剥離後もそのパターンが保持されるので、剥離した後に上側のテープに残っているパターンを観察した。

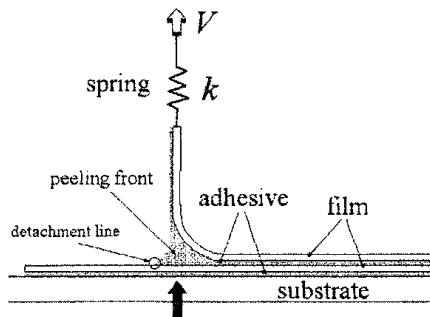


図 1: 実験の模式図。黒矢印は、剥離先端内での粘着物質の変形を観察した方向を指し示している。

2.2 速度－剥離力曲線

バネ定数 k を固定したとき、各剥離速度 V に対し得られる剥離力 F の時系列において、 F の変動範囲は図2のような速度－剥離力曲線として一つのグラフに表すことができる。図2には、バネ定数を異なった3つの値に固定した場合の速度－剥離力曲線が表されており、(a) から (c) へとバネ定数が大きくなっている。図2中の白丸は、剥離が一定の力で行われる定常剥離のときの F を表している。また、垂直線は F の変動幅を表している。図2(a)の結果から、剥離力の時間的挙動は、 V によって次の3つの領域 A, B, C に分けられることがわかる。領域 A: 剥離速度が低速での定常剥離領域 ($V \lesssim V_L \approx 0.6 \text{ mm/min}$)。領域 B: 剥離速度が高速での定常剥離領域 ($V \gtrsim V_H \approx 2.0 \text{ mm/min}$)。領域 C: 2つの定常剥離領域 A, B に挟まれた、 F が時間変動する領域 ($V_L \lesssim V \lesssim V_H$)。領域 C における F の時系列は自励振動をしていることが分かっており、図2の垂直線は、自励振動する剥離力の振幅を表している。

さらに、バネ定数 k の値を変えることによって得られた速度－剥離力曲線が図2の (b), (c) であり、次のことが明らかになった。(i) k が大きくなるに従って、振動剥離領域 C は狭まり、剥離力がほぼ一定となる剥離領域が広がる。(ii) 領域 C が現れる上限の k が存在する。(iii) 領域 C となる速度域において、 k が大きくなったところで剥離力が振動しなくなった領域では (以後、領域 D とする)、 F が V の増加に対して単調減少する。(iv) 領域 A の上限剥離速度 V_L と領域 B の下限剥離速度 V_H は k の大きさに依存せず、一定である。(v) 図2(a)の結果から、振動剥離における剥離力の振幅についての上限と下限は、領域 A と B の定常剥離における剥離力の値を外挿した値に近づいている。

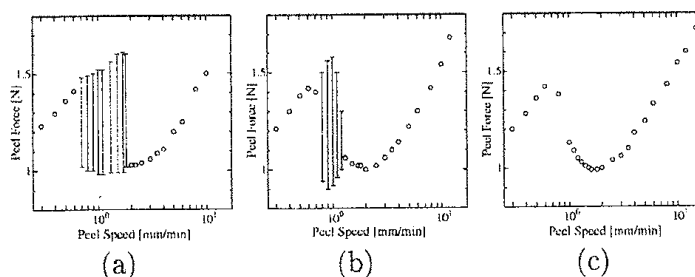


図2: 異なる3種類のパネ定数に対する速度－剥離力曲線。 $k =$ (a) $2.9 \times 10^2 \text{ N/m}$, (b) $1.7 \times 10^3 \text{ N/m}$, (c) $2.4 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。垂直線は、剥離力が振動するときの振幅を表している。

2.3 変形した粘着物質の形態

次に、剥離先端における粘着物質の変形を図1の黒い矢印の方向から観察した。その結果、剥離先端の近傍における変形した粘着物質の状態は、図3に示された2種類の状態のどちらかであることを確認した。図3の白矢印で指し示した部分にある白と黒のコントラストでできた境界 (つまり、図3(a)では波線状の境界、図3(b)では乱れた曲線部分) が剥離先端を表している。これらの図は共に、上から下に向かって剥離が進行している。ここで注目すべき点は、図3(a)に示されているような楕円状の形態が剥離先端の進行方向に対して前方に形成される速度域が存在することである。実際、我々の実験では、図3(a)の形態は $V \lesssim V_H$ で観察することができた。一方、図3(b)のような剥離状態は、 $V \gtrsim V_L$ で観察することができた。ここで、 $V_L < V_H$ であることから、 $V_L \lesssim V \lesssim V_H$ では、図3で示された2種類のどちらの形態も観察できる。図3(a)に示された剥離先端前方の楕円状の形態は、粘着物質内部に進入した空気によって粘着物質が変形し、空洞ができたため形成されたトンネル状構造の断面を表している。我々の実験から、トンネル状構造の安定性は剥離速度に依存しており、高速になると不安定となることが分かった。つまり、図3(b)で表される剥離状態は、トンネル状構造が不安定となり形成できなかった場合の状態であるといえる。そこで我々は、図3(a)で示されるような状態をトンネル構造を伴う剥離、図3(b)のようなトンネル構造が不安定な場合をトンネル構造を伴わない剥離と呼ぶことによって2つの剥離状態を区別することにする。

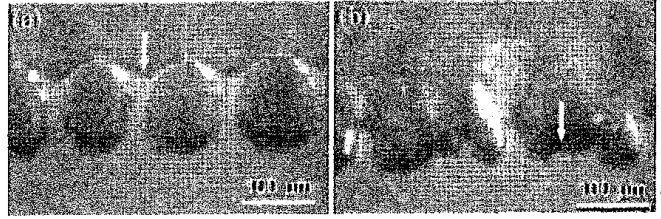


図 3: 剥離中の剥離先端近傍における変形した粘着物質の状態。右側の黒い矢印は剥離の方向を表している。(a) と (b) の白矢印は剥離先端を指し示している。バネ定数は共に、 $k = 8.4 \times 10^3 \text{ N/m}$ 。剥離速度は $V = (a) 0.4 \text{ mm/min}$ 、 $(b) 3.0 \text{ mm/min}$ 。

2.4 動的相図

第 2.3 節で述べたように、剥離先端近傍での粘着物質の状態は、図 3 で示される 2 種類のうちのどちらかになった。界面剥離においてこのような 2 種類の剥離状態が出現する理由は、トンネル構造の安定性が V の増加に伴って、安定状態から不安定状態に変化するためである。ここで、剥離はテープ幅の方向に平行で狭い一定の範囲内に粘着物質の変形を伴った 1 次元的な剥離先端で行われ、剥離先端が時間とともに進展することに着目すると、各時刻における剥離先端内の各場所では、上で述べた 2 種類の剥離状態のうちのどちらかの状態になっていることから、剥離後の粘着テープは、各時刻・各場所でのどのような剥離状態にあったかを、粘着物質の変形状態によって構成される 1 次元時空間パターンとして記憶していると考えられる。そして、剥離後の粘着テープに残された、変形した粘着物質によるトンネル構造の時空間分布を見ることによって、剥離状態を理解することができるのである。このような観点から我々は、剥離によって形成されたトンネル構造の時空間分布および、第 2.2 節で説明した速度－剥離力曲線で表される剥離の動力学的挙動に基づいて、 V と k をコントロール・パラメーターとして図 4 で示される動的相図を作成した。図 4 に示されているように、動的相図は大きく 4 つの領域に分類することができ、図中の \circ ・ \bullet ・ \odot ・ \triangle で占められたそれぞれの領域は、第 2.2 節で説明した、領域 A (低速での定常剥離状態)、B (高速での定常剥離状態)、C (振動剥離状態)、そして D (k が大きくなったため剥離力が振動しなくなった状態) に対応している。以下では各領域においてトンネル構造の時空間分布パターンがどのような特徴を持っているかを説明する。

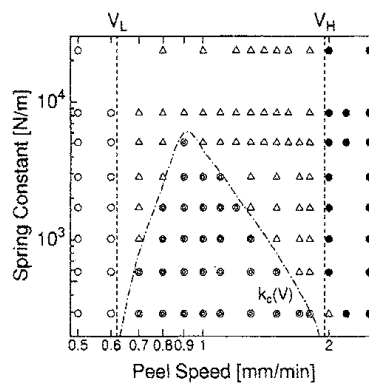


図 4: 形態を考慮した剥離挙動の動的相図。 \circ : トンネル構造を伴った定常剥離状態 (領域 A)、 \bullet : 荒い先端による定常剥離状態 (領域 B)、 \odot : 振動剥離状態 (領域 C)、 \triangle : 時空間欠的剥離状態 (領域 D)。

2.4.1 定常剥離

領域 A と B では、剥離先端内で形成された粘着物質の形態を反映して、粘着テープ上のパターンは図 5 に示されるように領域 A と B では大きく異なっている。図 5(a) は領域 A で剥離を行ったときに得られるパターンである。白く縞状になっている部分は空気が粘着物質内部に進入してできたトンネル構造を表しており、粘着テープ全体に渡ってトンネル構造が列をなして形成されていることが分かる。つまり、図 5(a) は各時刻における剥離先端全体でトンネル構造を伴う剥離が行われたことを意味している。トンネル幅やトンネル構造どうしの間隔がどのように決定されるかは今のところ明らかにはなっていないが、我々の実験結果から、トンネル幅は粘着物質の厚さに依存し、剥離速度には敏感ではないことが分かっている。図 5(b) は領域 B での剥離（つまり、トンネル構造を伴わない剥離）を行ったときのパターンであり、(a) の場合とは対照的に、特徴的なパターンは観察できない。図中には、ところどころ白く点在した領域が見られるが、この白く点在した領域は、剥離の際に粘着物質が大きく変形し、糸引き状に伸ばされた部分を表している。

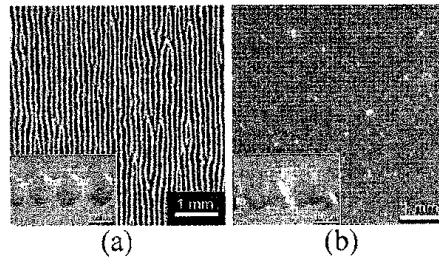


図 5: (a) 領域 A、(b) 領域 B で観察されるパターン。剥離は上から下に向かって行われている。

2.4.2 振動剥離

領域 C では、 F が時間的に（自励）振動しているが、得られる特徴的なパターンは図 6 のようになった。この図で剥離は上から下に向かって進んでおり、粘着テープの幅全体を表した図 6(a) から分かるように、パターンは上から下に向かって白と黒の帯状領域が交互に繰り返されることによりできた縞状パターンとしてとらえることができる。また、図 6(b) は、図 6(a) の一部を 5 倍に拡大したものであるが、白い帯状領域は $100\ \mu\text{m}$ 程度の幅をもった白いすじが横方向に一列に並んで構成されている。この白いすじは、図 5(a) で示されたトンネル構造を表したものであり、白い帯状領域では、トンネル構造を伴う剥離が行われていたことが分かる。一方、黒い帯状領域はトンネル構造が存在しないことから、図 5(b) に対応した剥離状態となっている。従って、図 6(a) に示されたような、剥離の進行方向に繰り返してできた縞状パターンは、トンネル構造を伴う剥離と伴わない剥離がそれぞれ各時刻においては剥離先端内でほぼ一様に行われる一方、時間的にはこの 2 つの剥離状態が交互に繰り返されてできた事を意味しており、剥離状態が周期的な変動をすることによって、剥離力の自励振動が引き起こされていたことが明らかとなった。

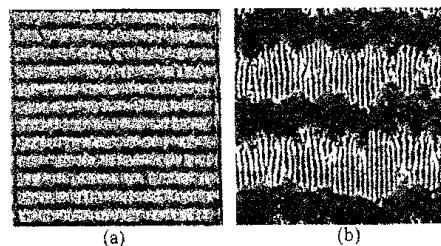


図 6: (a) 領域 C ($V = 0.8\text{ mm/min}$, $k = 2.9 \times 10^2\text{ N/m}$) で観察される振動剥離中の縞状パターン。剥離は上から下に向かって行われている。図のサイズは $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。(b) (a) の一部を 5 倍に拡大したもの。

2.4.3 時空間共存剥離

領域 D では、領域 C で観られたような F に対する自励振動は起こらなくなり、 F は時間に対しほぼ一定値となる。従って、第 2.4.1 節および第 2.4.2 節における議論を延長すれば、領域 D において F が一定となったことから、時空間的に一様な剥離状態が実現されていると期待できるかもしれない。しかしながら、 F がほぼ一定値にも関わらず、領域 D におけるパターンは図 7 が示すように、時空間的に乱れたものとなった。この図においても剥離は上から下に向かって行われており、図中の白い部分と黒い部分ではそれぞれ、トンネル構造を伴う剥離と伴わない剥離が行われたことを示している。ここで、図 7 のようなトンネル構造の時空間分布パターンを我々は時空間共存パターンと呼ぶことにする。図 7 の (a) と (b) では、パターン中の白と黒の部分の存在比が異なっていることを確認できるが、この違いは剥離速度 V によって生じており、 V が大きくなるに従って、トンネル構造を伴った剥離状態を表す白い部分が減少している。また、(a) は白い部分を背景にして黒い部分が点在したパターンである一方、(b) では逆に黒い部分が背景となり白い部分が点在してできたパターンとなっており、 V が大きくなると、白と黒の領域の連結性が逆転していることも分かる。

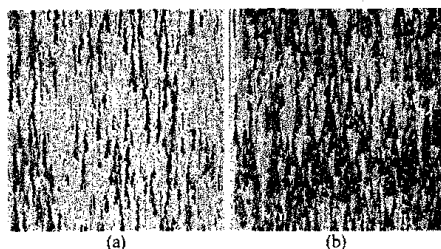


図 7: 領域 D における時空間共存剥離パターン。剥離速度は、 $V = (a) 0.8 \text{ mm/min}$ 、 $(b) 1.0 \text{ mm/min}$ 。パネ定数の値は共通で $k = 2.4 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。各図のサイズは $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 。

3 実験結果を再現するモデル [4]

3.1 状態変数の導入

第 2.3 節で述べたように、剥離中に変形した粘着物質によって形成されるトンネル構造の安定性のために、界面剥離において 2 つの剥離状態が存在することを我々は明らかにした。そして、剥離によって粘着テープ上に形成されたパターンは、これら 2 つの剥離状態で構成される時空間分布としてみるができることを提案した。そこで、2 つの剥離状態の違いを表す量として、我々は状態変数 ϕ を導入し、 ϕ を剥離速度 V と剥離力 F との間の比例係数として定義する。一様な剥離状態となっている定常剥離の場合、剥離先端の位置を s で表すと、実際に剥離が行われている剥離先端の移動速度は \dot{s} であること、および、定常剥離の場合は $\dot{s} = V$ であることから、

$$F = \phi \dot{s} = \phi V = \begin{cases} \phi_t V & (\text{トンネル構造を伴う剥離の場合}) \\ \phi_u V & (\text{トンネル構造を伴わない剥離の場合}) \end{cases} \quad (1)$$

という関係が成り立つ。ただし、実験結果から、 $\phi_t > \phi_u$ である。

3.2 剥離先端内での空間変動を考慮したモデル

時空間共存剥離では、同じ時刻の剥離先端の中でも剥離状態が非一様になっている。従って、状態変数の空間的変動も考慮しなければならない。そこで、粘着テープに形成されるパターンがトンネル構造の有無によって構成されていることから、トンネル構造の幅を単位とするサイズに剥離先端を分割して、それぞれの単位領域で異なる変形状態を取りうると考える。この考え方は、状態変数が1次元的に並んだ系として剥離先端をみなす事を意味している。状態変数の個数 N はテープ幅を L 、トンネル構造の幅を a で表せば、 $N \approx L/a$ で与えられる。従って、各時刻での剥離先端の状態は N 個の状態変数 $\{\phi_j\} (j = 1, \dots, N)$ によって記述することができ、剥離先端内の各単位領域における状態の時間変化が白と黒のパターンとして粘着テープ上に現れるのである。

以下では、系の時間発展を考える。まず、粘着テープ全体の剥離力は、剥離先端中では状態が非一様であるため、剥離先端におけるそれぞれの単位領域での変形状態に対応した剥離力の和として決まると考えるべきである。従って、バネの復元力とのつりあいの式は、

$$k(Vt - s) = \sum_{j=1}^N \phi_j \dot{s} \quad (2)$$

と書ける。ここで、 $s(t=0) = 0$ とした。次に、状態変数 ϕ_j の時間発展が、 ϕ_j に働く外力 $[f_{\text{ext}}]_j$ に対する剥離状態の応答 $f_{\text{int}}(\phi_j)$ で表現できるものと仮定する。 $[f_{\text{ext}}]_j$ については、剥離先端中の単位領域が粘着物質およびテープによって他の単位領域全体とつながっているため、 ϕ_j だけでなく ϕ_j の周りからの影響を受けると考えられ、次のように ϕ_j の平均量としてはたらくと考える。

$$[f_{\text{ext}}]_j = \bar{\phi}(\dot{s} - v^*) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\phi}$ は状態変数 ϕ_j について $j = 1$ から N までの平均を表している。 v^* は定数である。以上より、状態変数 ϕ_j の時間発展式は、

$$\dot{\phi}_j = -f_{\text{int}}(\phi_j) - [f_{\text{ext}}]_j + \xi_j \quad (4)$$

と表せる。ここで、応答 $f_{\text{int}}(\phi_j)$ は、状態変数 ϕ_j の安定性を決定する関数である。また、 ξ_j は粘着物質の不均一性に起因する空間ノイズを表している。

次に、異なる2種類の剥離状態が、剥離先端の中で共存している場合を考える。図8は領域Dにおける剥離先端のスナップショットである。トンネル構造の有る部分と無い部分を比較すると、無い部分の剥離先端の方が少し前に進み、ずれが生じている。このずれは剥離中ほぼ一定であるが、このずれのためにトンネル構造の有る部分と無い部分の境界では、トンネル構造の破壊が引き起こされる。ここで注意すべき点は、逆の現象、つまり境界でトンネル構造が形成されることは困難であるということである。なぜならば、トンネル構造のない部分の方が剥離先端は前に進行しているので、境界で粘着物質が再度基板にくっついて、トンネル構造を伴う剥離先端の位置に後退することは困難だからである。従って、2状態の境界ではトンネル構造が壊れやすいことを、剥離先端内の局所的な空間変動の寄与として状態変数の時間発展式に導入する必要がある。そこで、次の式(5)で与えられる項を式(4)に追加する。

$$f_{\text{sp}}(\phi_{j-1}, \phi_j, \phi_{j+1}) = -d\{\theta(\phi_j - \phi_{j+1}) + \theta(\phi_j - \phi_{j-1})\} \quad (5)$$

ここで、 $\theta(x) = 0(x < 0), x(x \geq 0)$ である。以上をまとめると、粘着テープの剥離における動的挙動およびパターン形成のモデルは次のように表せる。

$$\begin{cases} k(Vt - s) = N\bar{\phi}\dot{s} \\ \phi_j = -f_{\text{int}}(\phi_j) + f_{\text{sp}}(\phi_{j-1}, \phi_j, \phi_{j+1}) - \bar{\phi}(\dot{s} - v^*) + \xi_j, \quad (j = 1, \dots, N) \end{cases} \quad (6)$$

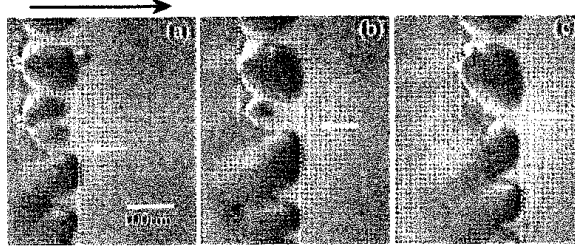


図 8: 剥離先端での局所的な空間変動。図 (a) 上の黒矢印は剥離の方向を表している。また、図中の白点線は、各状態での剥離先端の位置を表し、白矢印は 2 状態の境界を指している。

3.3 変数変換・モデルの提案

変数 s から u への変数変換 $\frac{k}{N}(Vt - s) = u$ を行くと、式 (6) は、

$$\begin{cases} \tau\dot{u} = V - u/\bar{\phi} \\ \phi_j = -f_{\text{int}}(\phi_j) + f_{\text{sp}}(\phi_{j-1}, \phi_j, \phi_{j+1}) + \bar{\phi}v^* - u + \xi_j, \quad (j = 1, \dots, N) \end{cases} \quad (7)$$

となる。ここで、 $\tau \equiv N/k$ である。式 (7) におけるコントロール・パラメータは V と τ であり、それぞれ実験でコントロールできる剥離速度とバネ定数に対応している。我々は、式 (7) を粘着テープの剥離における動的挙動およびパターン形成のモデルとして提案する。

4 シミュレーション結果

式 (7) における $f_{\text{int}}(\phi)$ については、実験事実から、 ϕ_t と ϕ_u が双安定となるように決めればよく、ここでは単純に、式 (8) で与えられるような、N 字型をした線形区分関数を採用する。

$$f_{\text{int}}(\phi) = \begin{cases} \frac{b}{a}(\phi - \phi_u^0) + f_0, & (\phi \leq \phi_u^0 + a) \\ -\frac{2b}{(\phi_t^0 - \phi_u^0) - 2a} \left(\phi - \frac{\phi_t^0 + \phi_u^0}{2} \right) + f_0, & (\phi_u^0 + a < \phi \leq \phi_t^0 - a) \\ \frac{b}{a}(\phi - \phi_t^0) + f_0, & (\phi_t^0 - a < \phi) \end{cases} \quad (8)$$

我々が用いた各係数の値を以下に示す。関数 f_{int} に対しては、 $f_0 = -3$ 、 $\phi_t^0 = 2$ 、 $\phi_u^0 = 1$ 、 $a = 0.1$ 、 $b = 0.3$ とした。 f_{sp} 中の d は、 $d = 0.5$ を用いた。また、 $v^* = 0.5$ 、 $N = 256$ とした。式 (7) の時間発展にはオイラー法を用い、時間ステップ Δt は $\Delta t = 0.001$ とした。また、 j に関して周期境界条件を用い、初期条件は $u(t=0) = 0$ および $\phi_j(t=0) = 2 (= \phi_t^0)$ とした。 ξ_j は、 -12.5 から 12.5 までの一様乱数を採用した。そして、 V と τ の値を変化させ、モデルの動力的挙動を調べた。

4.1 得られるパターン

図9は、剥離速度 V を (a)1.7 と (b)3.4 にしたときの状態変数 $\{\phi_j\}$ の時空間パターンを表している。 τ は、共に 10.0 であるとした。図9(a)に示されているように、横方向には各時刻における $\{\phi_j\}$ の値が並んでおり、上から下に向かって剥離が進行、つまり時間が経過している。図のグレイスケールは ϕ_j の大きさに対応している。各図のサイズは 256×256 であり、縦方向には 5000 時間ステップごとの $\{\phi_j\}$ を描画している。図9から分かるように、 $V = 1.7$ と 3.4 では、時空間的に一樣なパターンが共に得られた。これらの図は、(a) トンネル構造を伴う定常剥離状態（動的相図の領域A）、(b) トンネル構造を伴わない定常剥離状態（領域B）を再現している。

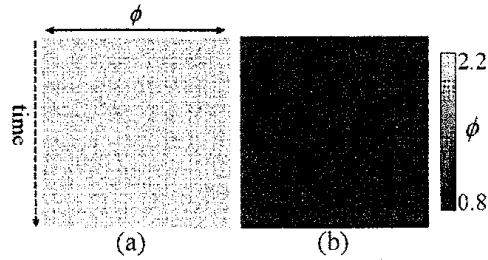


図9: 定常剥離の時空間パターン。 $V = (a)1.7, (b)3.4$

図10は特徴的な6つの時空間パターンを示している。上の3枚の図(a~c)が $\tau = 100$ の時の図で、下の3枚(d~f)が $\tau = 1.0$ の時に得られたパターンを示している。 τ の定義から、 τ が小さくなることは k が大きくなることに対応しているので、(a)~(c)は、 k が小さいときのパターンに対応し、領域Cで起こる振動剥離が再現され、(d)~(f)は k が大きいときのパターンであり、領域Dでおこる時空間欠の剥離が再現されており、第2.4節で示した実験事実と定性的に一致する結果が得られた。さらに、図10では、左から右へ向かって V が大きくなっており、 $V = (a, d) 1.95, (b, e) 2.4, (c, f) 2.9$ の結果を示している。時空間パターンの V 依存性について、これら6枚の図には次のような性質が認められる。(i) 振動剥離に対応した上の列 ($\tau = 100$) では、 V が速くなるに従って、振動の周期が速くなっている。この傾向は実験においても確かめられている。(ii) 時空間共存剥離に対応した下の列 ($\tau = 1.0$) に着目すると、 V が速くなるに従って、各時刻における白領域の割合が少なくなる。(iii) V の変化により領域の連結性が逆転する。(iv) 剥離先端内での白領域と黒領域の境界では、白い領域が収縮し、黒い領域が広がる傾向にある。以上の性質は、実験と定性的に一致している。

4.2 速度－剥離力曲線

τ を固定して、剥離速度 V を変化させたときの V に対する u の変動幅をグラフにプロットすると、図11のような $V-u$ 曲線が得られる。図は、 τ を異なる3つの値に固定した場合の、それぞれの結果を表しており、(a) から (c) へと τ が小さくなっている。 $(\tau = (a) 50.0, (b) 5.0, (c) 0.01)$ 。図中の白丸は、剥離が一定の力で行われた定常剥離を表しており、垂直線は剥離中に力が自励振動したことを意味し、その振動幅を表している。図2と図11を比較すると、シミュレーションで得られた $V-u$ 曲線が実験における速度－剥離力曲線とよく一致していることが分かる。また、 τ が小さくなるに従って、振動領域Cは狭まり、時間に対して u がほぼ一定となる領域が広がることも分かった。さらに、全速度域に渡って振動領域Cが存在しない上限の τ が存在し、 τ を小さくすることによって領域Cにおいて振動していた u が振動しなくなった領域（領域Dとする）では、 u が V の増加に対して単調減少することも再現されており、実験結果の領域Dで観られる結果と一致している。

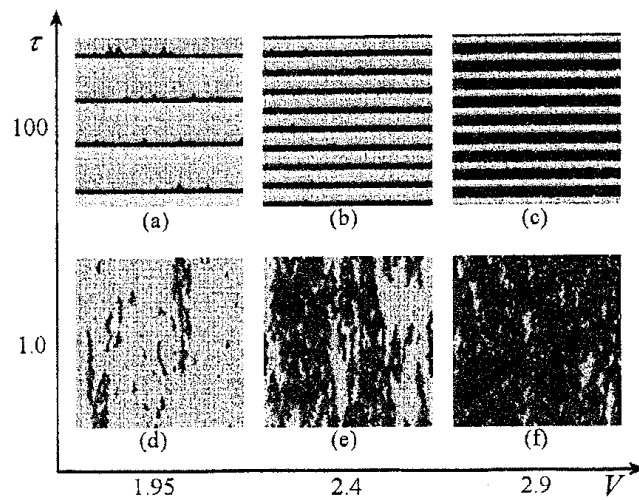


図 10: シミュレーションで得られるパターン

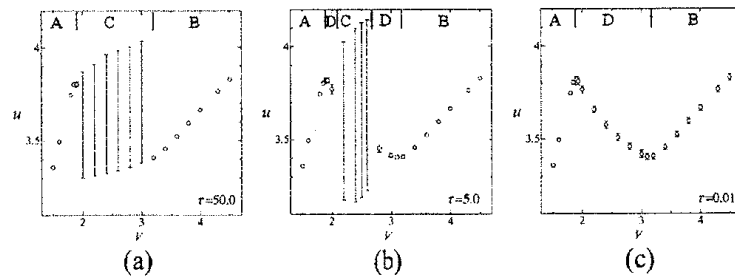


図 11: シミュレーションによって得られる速度－剥離力曲線。 $\tau =$ (a)50.0, (b)5.0, (c)0.01。

4.3 動的相図

以上の結果を踏まえて、実験の場合と同様、状態変数の時空間パターンを考慮した動的相図を作成し、得られたのが図 12 である。実験結果から得られた図 4 と比較するために、図 12 では縦軸が τ^{-1} になっていることに注意せよ。モデル式 (7) から得られたこの動的相図は、実験から得られた相図の場合と同様、異なる 2 つの状態を表す白と黒の領域で構成される時空間パターンの特徴によって、大きく 4 つの領域に分類することができる。図 12 にある \circ は白い領域が時間・空間ともに一様に現れる場合、 \bullet は黒い領域が時間・空間ともに一様に現れる場合を表しており、それぞれ実験の動的相図における領域 A と B に対応している。また、 \odot は空間的には一様に白い領域と黒い領域が周期的に交互に繰り返して現れる場合を意味し、領域 C に対応している。さらに、 Δ で占められた領域では、実験の動的相図における領域 D で観られる時空間パターンと似たパターンが得られた。我々のモデルによって得られた動的相図 (図 12) は、実験から得られる動的相図 (図 4) を極めてよく再現していることが分かる。

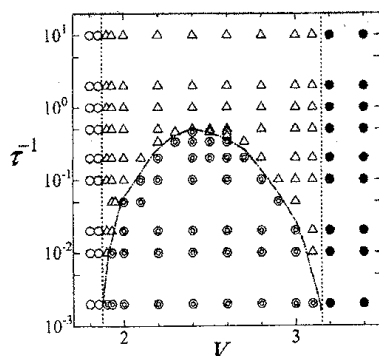


図 12: シミュレーションにより得られた動的相図。図中の記号 (\circ ・ \bullet ・ \odot ・ \triangle) の意味については図 4 参照。

5 まとめ

本稿では、粘着テープを界面剥離が起こるように一定の速度で引き剥がしたときの剥離挙動およびパターン形成について調べた結果を報告した。変形した粘着物質によって形成されるトンネル構造の安定性を表す状態変数を導入し、状態変数が剥離先端内に一次元的に並んでいると考えて、その集団運動として剥離挙動が理解できることを示してきた。我々が提案してきたモデルは、剥離挙動およびパターン形成に関する実験事実を定性的に良く再現しているといえる。この剥離挙動において本質的な要因は、(1) トンネル構造の安定性によって生じる 2 状態の双安定性、(2) 2 状態の境界でトンネル構造が壊れやすいという局所的な相互作用と、テープ全体での粘着力を平均した値が各状態変数に外力として働いているという大域的な相互作用との競合である。局所的な相互作用によって、トンネル構造の存在している領域が減少すると、テープ全体の剥離力は低下する。剥離力が低下すると、双安定状態の限界に近づくため、トンネル構造を伴わない剥離が行われていた領域では、トンネル構造が形成されやすくなり、再びテープ全体の粘着力は強くなる。さらに、トンネル構造が形成された領域では、局所的な相互作用により、再びトンネル構造の領域が減少し、テープ全体の剥離力は低下することになる。このサイクルを繰り返すことによって領域 D におけるパターンが形成され、2 つの相互作用が釣り合うように領域比および剥離力が決定されると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki and A. Toda: J. Phys. Soc. Jpn., 71 (2002) 1618.
- [2] Y. Yamazaki and A. Toda: J. Phys. Soc. Jpn., 73 (2004) 2342.
- [3] Y. Urahama: J. Adhesion, 31 (1989) 47.
- [4] Y. Yamazaki and A. Toda: to be published in Physica D.